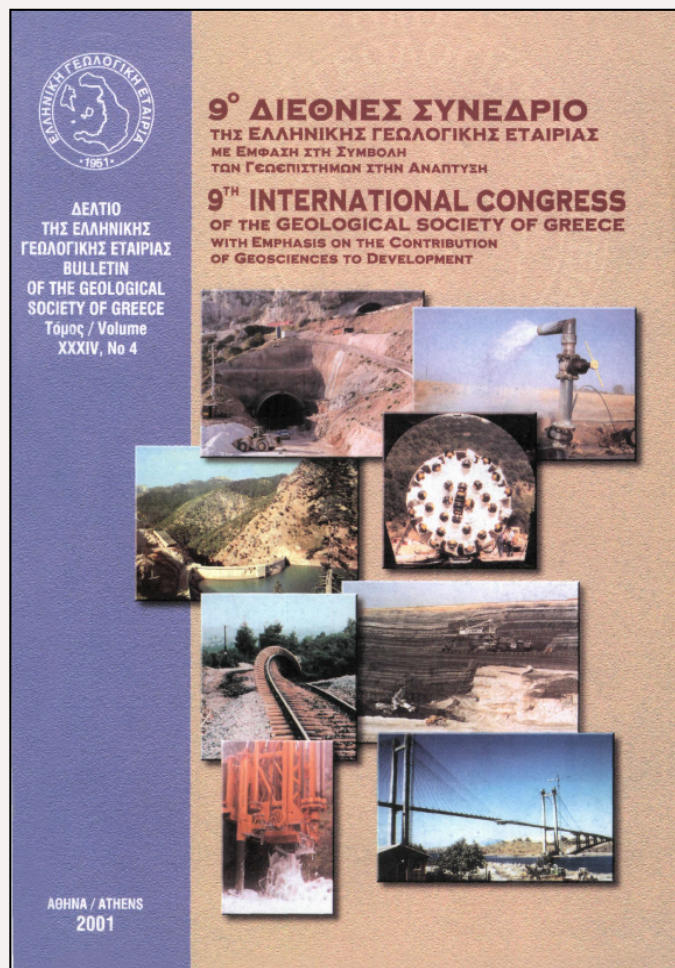


## Bulletin of the Geological Society of Greece

Vol. 34, 2001



### The Gujarat, West India, earthquake (Jan 26th 2001). A geodynamic event in an intraplate compressional regime?

ΔΑΝΑΜΟΣ Γ. University of Athens, Dept. of Geology  
 ΛΕΚΚΑΣ Ε. University of Athens, Dept. of Geology  
 ΛΟΖΙΟΣ Σ. University of Athens, Dept. of Geology

<https://doi.org/10.12681/bgsg.17234>

Copyright © 2018 Γ. Δ. ΔΑΝΑΜΟΣ, Ε. Λ. ΛΕΚΚΑΣ, Σ. Γ. ΛΟΖΙΟΣ



### To cite this article:

ΔΑΝΑΜΟΣ, Γ., ΛΕΚΚΑΣ, Ε., & ΛΟΖΙΟΣ, Σ. (2001). The Gujarat, West India, earthquake (Jan 26th 2001). A geodynamic event in an intraplate compressional regime?. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 34(4), 1405-1415.  
 doi:<https://doi.org/10.12681/bgsg.17234>

**Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΣΤΟ GUJARAT, ΔΥΤΙΚΗ ΙΝΔΙΑ (26 ΙΑΝ. 2001).  
ΕΝΑ ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ  
ΣΕ ΕΝΔΟΗΠΕΙΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ;\*  
Γ. Α. ΔΑΝΑΜΟΣ<sup>1</sup>, Ε. Α. ΛΕΚΚΑΣ<sup>1</sup> & Σ. Γ. ΛΟΖΙΟΣ<sup>1</sup>**

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Ο ισχυρότατος σεισμός της 26<sup>ης</sup> Ιαν. 2001 στην επαρχία Gujarat της Δ. Ινδίας ( $M_s=7.7$ ), εκδηλώθηκε εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά από το μέτωπο της σύγκρουσης στη ζώνη των Ιμαλαΐων, σε μια περιοχή που και στο παρελθόν έχει δώσει αντιστοίχου μεγέθους καταστροφικούς σεισμούς. Εδαφικές διαρρήξεις, οι οποίες συνδέονται με τις ρηξιγενείς επιφάνειες που δραστηριοποιήθηκαν με το σεισμό, εντοπίστηκαν σε πολλές θέσεις και όλες παρουσιάζουν έναν σαφή ανάστροφο χαρακτήρα με συμμετοχή δεξιόστροφης οριζόντιας συνιστώσας, γεγονός που έρχεται σε απόλυτη συμφωνία τόσο με το μηχανισμό γένεσης του σεισμού όσο και τη σεισμο-τεκτονική "ιστορία" της περιοχής. Σημαντικό ποσοστό της παραμόρφωσης φαίνεται ότι εκτονώθηκε μέσα από πλαστική παραμόρφωση με τη μορφή flexural-slip πτύχωσης, ενώ εγκάρσιες εφελκυστικές διαρρήξεις δημιουργήθηκαν τόσο από τη δεξιόστροφη συνιστώσα διάτμησης όσο και από την τοπική έκταση στα κορυφαία των flexural τύπου πτυχώσεων. Αρκετές επίσης διαρρήξεις σχετίζονταν άμεσα με φαινόμενα ρευστοποιήσεων, καθιζήσεων και κατολισθήσεων.

**ABSTRACT**

The Jan. 26, 2001,  $M_s=7.7$  earthquake occurred in Gujarat region of W. India, which lies 200-400 Km away from the active plate boundary zone, between the Indian subcontinent and the Asian plate, along the India-Pakistan border and the Himalayan belt. An  $M_s=7.7\pm0.2$  earthquake also occurred in the same region in 1819. A zone of co-seismic E-W surface ruptures, 30-40 Km long and 15-20 Km wide, observed near the epicentral area and seems to be associated with pre-existing reverse faults and thrust folds, which were partially reactivated during the recent earthquake. Except the reverse vertical displacement a significant right lateral displacement was also observed along these E-W surface ruptures. This  $M_s=7.7$  seismic event has been also accompanied by a large scale flexural-slip folding, as the absence of significant co-seismic fault displacement and fault scarp shows. This type of compressional tectonic deformation is also confirmed by the focal mechanism of the earthquake and the seismo-tectonic "history" of the area. The NW-SE open cracks, also observed along the same zone, are associated with the right lateral horizontal displacement of the reactivated fault (or branch faults) and the development of local extensional stress field in the huge anticlinal hinges of the co-seismic flexural-slip folds. A large number of ground ruptures, failures and open cracks are also associated with extensive sand boils, liquefaction phenomena and lateral spreading.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Δυτική Ινδία, Σεισμός Gujarat, Ανάστροφα Ρήγματα, Λοξοζωνικές Πτυχές, Επιφανειακές Διαρρήξεις, Εφελκυστικές Διακλάσεις, Ρευστοποιήσεις

**KEY WORDS:** West India, Gujarat Earthquake, Reverse Faulting, Flexural Folding, Surface Ruptures, Extensional Cracks, Lateral Spreading, Liquefaction.

**1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

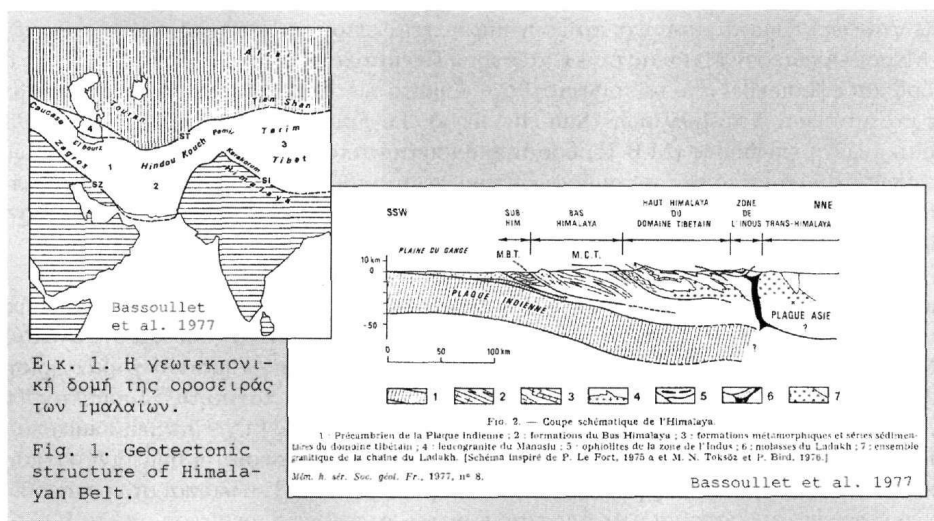
Την 26<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2001 (08:46 τοπική ώρα) ισχυρότατος σεισμός έπληξε την επαρχία Gujarat της Δυτικής Ινδίας. Το μικροσεισμικό επίκεντρο εντοπίστηκε πλησίον της πόλης Bhachau (23.40N, 70.32E, Gujarat, Δυτ. Ινδία). Το μέγεθος του σεισμού προσδιορίστηκε ίσο με  $M_s=7.7$  της κλίμακας Richter, ενώ το εστιακό βάθος του στα 23.6 Km (στοιχεία από U.S.G.S.). Ο σεισμός αυτός είναι ο μεγαλύτερος που έχει καταγραφεί στην

\* THE GUJARAT, WEST INDIA, EARTHQUAKE (JAN. 26TH 2001). A GEODYNAMIC EVENT IN AN INTRAPLATE COMPRESSSIONAL REGIME?

1. University of Athens, Dept. of Geology, Panepistimioupoli Zografou, GR 157 84, Athens, Greece.



Η όλη διαδικασία έλαβε χώρα σε τρεις φάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε τρία μέγιστα γεωδυναμικά επεισόδια που μπορούν να διακριθούν μέσα στην τεκτονική ιστορία της περιοχής (Εικ. 1):



- Η πρώτη φάση περιλαμβάνει την εξαφάνιση του ωκεάνιου φλοιού που υπήρχε μεταξύ της Ινδικής μικροηπείρου και του ηπειρωτικού περιθωρίου του Θιβέτ και το σχηματισμό της οφιολιθικής ουλής Ινδού – Τσάνγκ-πό (Βραχμαπούτρα) (Le Fort 1973, Bassoulet et al. 1977, Fuchs 1996-97). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο εν λόγω ωκεάνιος φλοιός δεν αντιστοιχεί στον κύριο ωκεανό της Τηθύος, ο οποίος βρίσκεται βορειότερα στην περιοχή του Tien Shan (βόρεια του οροπεδίου του Tarim και νότια των Αλτάιων ορέων), αλλά στο νοτιότερό της κλάδο (Crawford 1974, Boulin & Bouyx 1977, Fuchs 1996-97). Η διαδικασία της εξαφάνισης του ωκεάνιου φλοιού αρχίζει με τη σύγκρουση του βόρειου μώλου της Ινδικής μικροηπείρου με το νησιωτικό τόξο της Ασίας στο Άνω Κρητιδικό (80 Μ.Α.) και τελειώνει με την πλήρη απορρόφηση της ωκεάνειας λεκάνης και την τελική σύγκρουση της βορειοανατολικής πλευράς της Ινδικής μικροπλάκας με την Ευρασία στο Υπέρσιο – Λουτήσιο (45-50 Μ.Α.) (Le Fort 1973, Bossart & Ottiger 1989, Fuchs 1996-97). Το κλείσιμο και η εξαφάνιση του ωκεανού συνοδεύεται από τα γεωδυναμικά φαινόμενα της τοποθέτησης των οφιολίθων πάνω στο φλύσχη των επιηπειρωτικών ιζημάτων του περιθωρίου της Ινδικής μικροπλάκας (obduction) και την τελική σύνθλιψή τους μεταξύ των δύο ηπειρωτικών φλοιών, του φλοιού του Θιβέτ (Transhimalaya) προς τα πάνω και του ινδικού φλοιού προς τα κάτω. Το συνολικό πάχος των οφιολίθων που συνεθλίβησαν είναι της τάξης των 2.000 m (Bassoulet et al., 1977).
- Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει τη μεταπήδηση της ζώνης της κύριας τεκτονικής κίνησης και ολίσθησης νοτιότερα, στο εσωτερικό της Ινδικής μικροηπείρου, καθώς η ζώνη τεκτονικής ολίσθησης κατά μήκος της οφιολιθικής πλέον ουλής (του ωκεανού Ινδού – Τσάνγκ-πό) παύει να λειτουργεί και το όλο σύστημα έχει ακινητοποιηθεί. Η αυτόματη μετάθεση προς νότο της ζώνης τεκτονικής ολίσθησης, λόγω αδρανοποίησης της προηγούμενης οδηγεί στην υποεπώθηση των Χαμηλών Ιμαλαίων (Bas Himalaya) κάτω από τα Υψηλά Ιμαλαία (Haute Himalaya). Πρόκειται για δύο παράλληλες ζώνες κυρίως θαλασσίων επιηπειρωτικών ιζημάτων εκ των οποίων η πρώτη (Χαμηλά Ιμαλαία) βρίσκεται πλησιέστερα προς τη χέρσο (προς την πλευρά της Ινδικής μικροπλάκας) από ότι η δεύτερη. Η τεκτονική κίνηση κατά μήκος της ζώνης κύριας ολίσθησης (Main Central Thrust, M.C.T.) συνοδεύεται από πτυχώσεις της ιζηματογενούς επιηπειρωτικής σειράς που δημιουργούν μεγαδομές κλίμακας πολλών χιλιομέτρων. Το κυριότερο στοιχείο της δραστηριότητας της M.C.T. είναι πρώτα η γένεσιση, έπειτα η μγματισμοποίηση και τελικά η ανάτηξη, λόγω δυναμομεταμορφώσεως σε μεγάλο βάθος φλυσχικών ιζημάτων που σχηματίζουν ειδική κατηγορία γρανιτών, τους λευκογρανίτες του Manaslu. Η ηλικία της ανάτηξης και διεύθυνσης του λευκογρανιτικού μάγματος έχει προσδιοριστεί ραδιομετρικά στα 28 Μ.Α. (Ολιγόκαινο) και στα 14-17 Μ.Α. (Μέσο Μειόκαινο). Οι δύο φάσεις γρανιτοποίησης συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία της M.C.T. και την τεκτονική των καλυμμάτων των Υψηλών και Χαμηλών Ιμαλαίων, την οποία και χρονολογούν. Ο παροξυσμός της φάσης τοποθετείται στο Μέσο Μειόκαινο (Le Fort 1973, 1989, Bassoulet et al 1977, Fuchs 1996-97).
- Η τρίτη φάση περιλαμβάνει την μεταπήδηση ακόμα νοτιότερα προς το εσωτερικό της Ινδικής μικροηπείρου της ζώνης κύριας τεκτονικής ολίσθησης. Η κίνηση αυτή εκδηλώνεται έως και σήμερα με την ενεργό υποε-



πώθηση της Ινδικής μικροπλάκας κάτω από τη ζώνη των παραμορφωμένων ιζημάτων των Χαμηλών Ιμαλαίων κατά μήκος της κύριας περιθωριακής επιφάνειας ολίσθησης (Main Boundary Thrust, M.B.T.) Στο μέτωπο της M.B.T. και κατά μήκος της ζώνης αυτής, τα αυτόχθονα έως παραυτόχθονα ηπειρωτικά (ποταμο-χερσαίας φάσεως) ιζήματα, που σχηματίζουν μια παχειά σειρά μολассικού τύπου, πάχους 5.000 m και ηλικίας Μέσου-Ανώτερου Μειοκαίνου – Κατώτερου Πλειστοκαίνου (13-1 εκατομμύρια έτη), έχουν πτυχωθεί αμυδρά και επιπτευθεί από τα παραυτόχθονα ιζήματα των ενοτήτων των χαμηλών Ιμαλαίων. Σχηματίζουν τις ενότητες των Υπο-Ιμαλαίων (Sub-Himalaya) (Le Fort 1973, 1989, Herail et al. 1986). Η κύρια περιθωριακή ζώνη επώθησης (M.B.T.) δραστηριοποιείται από το Μέσο Μειόκαινο και λειτουργεί έως σήμερα, όπως φαίνεται από την παραμόρφωση που υφίστανται τα αλλουβιακά ιζήματα των πεδιάδων των παραποτάμων του Γάγγη στους πρόποδες των λόφων των Υπο-Ιμαλαίων. Η M.B.T. είναι ενεργή από το Αν. Σεραβάλλιο έως σήμερα (Fuchs 1996-97).

Επισημαίνεται ότι η γεωμετρία του τόξου των Ιμαλαίων δεν παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος του, αλλά μεταβάλλεται από ΒΔ-ΝΑ σε Β-Ν περίπου τόσο στα δυτικά, προς το Πακιστάν όσο και στα ανατολικά προς την μεριά της Μπούρμα. Η αλλαγή αυτή προϋποθέτει και την αλλαγή στα κινηματικά χαρακτηριστικά και έτσι προς τα ΒΑ η κίνηση εκδηλώνεται κυρίως με πλάγια υποβύθιση και ταχύτητα 52 mm/έτος (τόξο Burma-Andaman), ενώ προς τα ΒΔ με εγκάρσια ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (π.χ. Chaman Fault) και ρυθμό κίνησης 40 mm/έτος (Bhatia et al. 2001). Νότια από το μέτωπο της σύγκρουσης, η σημερινή κίνηση της ινδικής μικροηπείρου δεν προκαλεί παραμορφώσεις στο μέτωπο μόνο της M.B.T. αλλά και στο εσωτερικό της πλάκας της Ινδίας, όπως δείχνει άλλωστε και ο σεισμός στο Gujarat. Αντίθετα, βορειότερα από τα Ιμαλαία, ο εξαιρετικά παχύς φλοιός του υψιπέδου του Θιβέτ, χαρακτηρίζεται από καθεστώς εφελκυσμού με κανονικά ή πλάγια ολίσθησης ρήγματα.

### 3. ΤΟ ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ (ΠΑΛΗΓΕΙΑΣ) ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ο σεισμός του Gujarat αντιστοιχεί, όπως προαναφέρθηκε, σε ένα γεωδυναμικό φαινόμενο που έλαβε χώρα σε ενδοηπειρωτικό περιβάλλον και συγκεκριμένα στο εσωτερικό της Ινδικής πλάκας που χαρακτηρίζεται από ένα προκαμβριο γνευσιοποιημένο και γρανιτοποιημένο κρυσταλλικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο επικάθεται μια παχειά σειρά επιηπειρωτικών ιζημάτων, ηλικίας Φανεροζωικού (Καμβρίου – Πλειστοκαίνου). Το ιζηματογενές αυτό επικάλυμμα αποτελείται από εναλλαγές ηπειρωτικών και θαλάσσιων ακολουθιών που διαχωρίζονται μεταξύ τους από επιφάνειες ασυμφωνιών που έχουν προέλθει από ηπειρογενετικές κινήσεις.

Το φαινόμενο αυτό δεν είναι το μοναδικό στην σεισμική ιστορία της περιοχής δεδομένου ότι στην ευρύτερη περιοχή του Kachchh (της επαρχίας Gujarat) το 1819 εκδηλώθηκε αντίστοιχου μεγέθους καταστροφικός σεισμός ( $7.7 \pm 0.2$ ) ενώ από τότε μέχρι σήμερα συνέβησαν περισσότεροι από 5 μικρότερου μεγέθους αλλά ισχυροί σεισμοί που συνοδεύθηκαν από σημαντικές καταστροφές. Όλοι οι μηχανισμοί γένεσης δείχνουν ανάστροφα ρήγματα με μικρή συμμετοχή οριζόντιας κίνησης, με γενική διεύθυνση περίπου Α-Δ, που αντιστοιχούν σε καθεστώς συμπίεσης από την προς βορρά σύγκρουση της Ινδικής μικροηπείρου. Έτσι λοιπόν η ευρύτερη υπό σεισμική διέγερση περιοχή του Kachchh χαρακτηρίζεται από την παρουσία απτύχων οριζοντίων έως υποοριζοντίων μεσοζωικών και καινοζωικών ιζημάτων, που κοντά στις ζώνες που εκδηλώνεται η σεισμική διέγερση και η έντονη παραμόρφωση, πτυχώνονται δημιουργώντας μεγάλης κλίμακας ανοικτά σύγκλινα και αντίκλινα, με ίδια Α-Δ διεύθυνση (Malik et al. 2000).

Από σεισμοτεκτονική άποψη η ευρύτερη περιοχή οριοθετείται προς Βορρά και προς Νότο από δύο κύριες ρηξιγενείς ζώνες, διεύθυνσης Α-Δ περίπου, γνωστές με τα ονόματα Nagar Parkar Fault (προς Βορρά) και Kachchh Mainland Fault (προς Νότο).

Μικρότερης κλίμακας ρηξιγενείς ζώνες με ίδια διεύθυνση διασχίζουν το εσωτερικό της περιοχής. Η δραστηριότητα των διαφόρων ρηξιγενών ζωνών μέσα στο χρόνο έχει διαμορφώσει ένα χαρακτηριστικό ανάγλυφο υπερυψωμένων λόφων, που έρχεται σε αντίθεση με την εικόνα της πανεπιπέδωσης που επικρατεί στην ευρύτερη περιβάλλουσα περιοχή. Τα στοιχεία που δημιουργούν τον σχετικά αναπτυγμένο κατακόρυφο διαμελισμό του λοφώδους αναγλύφου είναι η παρουσία διαφόρων γενεών πλευρικών κορημάτων και κώνων κορημάτων (αλλουβιακών ριπιδίων) και μορφολογικών ασυνεχειών, χαραδρών που έχουν προέλθει από την έντονη κατά βάθος διάβρωση. Χαρακτηριστικές είναι οι αναβαθμίδες του Τεταρτογενούς, οι οποίες έχουν διαμελισθεί από βαθιά ρέματα, καθώς και οι αποκομμένοι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου, που δημιουργούν στα σημεία αποκοπής τοπικές μικρές λεκάνες συγκέντρωσης νερού. Τα στοιχεία του αναγλύφου και η μορφή τους ελέγχονται πλήρως από την ενεργό τεκτονική της περιοχής. Συγκεκριμένα, οι σειρές των λόφων, οι αναβαθμίδες και οι μορφολογικές ασυνέχειες αναπτύσσονται κατά μία διεύθυνση Α-Δ, είναι δηλαδή προσανατολισμένες πα-



Ινδία τα τελευταία 150 χρόνια, δεδομένου ότι ο προηγούμενος ισχυρότατος σεισμός είχε σημειωθεί στις 16 Ιουνίου 1819, εκδηλώθηκε δε στην ίδια περίπου επικεντρική περιοχή.

Ο σεισμός του Gujarat ήταν τόσο ισχυρός ώστε έγινε αισθητός σε περιοχές που απέχουν από το επίκεντρο περισσότερο από 1.500 km και μεταξύ αυτών στη Βομβάη, στο Δελχί, στο Καράτσι και σε πόλεις του Νεπάλ. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η περιοχή που επλήγη (επαρχία Gujarat) είναι η καρδιά της Ινδικής βιομηχανίας (μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, διύλιση πετρελαίου, χαλυβουργίες, κ.ά.), οι επιπτώσεις δε του σεισμού είναι τεράστιες, αν ληφθεί υπόψη ότι το κατά κεφαλή εισόδημα στην ευρύτερη περιοχή είναι πάρα πολύ χαμηλό. Οι πόλεις που βρίσκονται στην επικεντρική περιοχή (Bhachau, Bhuj, Anjar, Kandla) έχουν υποστεί ολοσχερή ή σχεδόν ολοσχερή καταστροφή. Η πόλη του Bhachau, αλλά και πολλές γειτονικές κομποπόλεις και χωριά έχουν ισοπεδωθεί, ενώ έχουν σημειωθεί καταρρεύσεις πολυώρων κτιρίων σε πόλεις που απέχουν περισσότερο από 350 Km από την περιοχή του επικέντρου, όπως στην πρωτεύουσα του Gujarat, Ahmedabad. Η εφημερίδα Times of India της 1<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου ανέφερε τουλάχιστον 35.000 νεκρούς, ενώ οι πρόσφατες εκτιμήσεις τους ανεβάζουν στις 100.000.

Όπως είναι γνωστό, η πλειονότητα των σεισμών, που εκδηλώνονται σε περιβάλλοντα σύγκλισης πλακών, κατανέμεται κατά μήκος του ορογενετικού τόξου, δηλαδή είτε στις περιοχές της τάφρου και του εξωτερικού νησιωτικού τόξου, είτε στις περιοχές της οπισθοτάφρου και του ηφαιστειακού τόξου, όπου παρατηρείται το σύνολο των γεωδυναμικών διαδικασιών που συνοδεύουν την ορογένεση. Γενικά, οι σεισμοί κατά μήκος συγκλινουσών πλακών εκδηλώνονται κατά κύριο λόγο σε περιοχές ενεργών τόξων (Ελλάδα, Ιαπωνία, Ταϊβάν). Η διαφορά από τα υπόλοιπα ενεργά ορογενετικά τόξα είναι ότι στην περιοχή των Ιμαλαίων και της Ινδικής μικροπλάκας το γεωτεκτονικό καθεστώς αντιστοιχεί σε υπερσύγκρουση (supercollision) ηπειρωτικών φλοιών, διαδικασία που σχετίζεται άμεσα με την υψηλή σεισμικότητα που παρατηρείται σε όλη τη ζώνη της σύγκρουσης. Ο σεισμός του Gujarat (Δυτ. Ινδία), όμως, είχε επίκεντρο (23.40N, 70.32E), το οποίο τοποθετείται στο εσωτερικό της Ινδικής μικροπλάκας, σε απόσταση 400-800 Km από τον άξονα της οροσειράς των Ιμαλαίων, όπου βρίσκονται τα παραμορφωμένα ηπειρωτικά περιθώρια των πλακών Ινδίας - Ασίας και η αιχμή των ορογενετικών διεργασιών. Σε μια περιοχή δηλαδή που αναμένεται να είναι σταθερή. Παρ' όλα αυτά, από το καθεστώς της σύγκρουσης δημιουργούνται οι κατάλληλες δυναμικές συνθήκες στο εσωτερικό της πλάκας ώστε σε συγκεκριμένες ζώνες να εκδηλώνονται ρήγματα (συνήθως ανάστροφα ή οριζόντια ολίσθησης και σπανιότερα κανονικά) που είναι υπεύθυνα για τη σεισμική δραστηριότητα, όπως αυτή στην επαρχία του Gujarat. Σημειώνεται ότι για ορισμένους ερευνητές (Lettis & Hengesh 2001) η τεκτονική τοποθέτηση της ευρύτερης περιοχής της επαρχίας του Gujarat είναι ακόμα προβληματική. Και αυτό γιατί στην περιοχή παρουσιάζονται τόσο χαρακτηριστικά περιθωρίων όσο και χαρακτηριστικά εσωτερικού πλάκας και μάλιστα η παρουσία μιας ζώνης με μεγάλης κλίμακας ενεργά ανάστροφα ρήγματα και πτυχές (όπως επιβεβαιώνουν τα μεγάλα μεγέθη και οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών), αποδεικνύει ότι αντιπροσωπεύει τουλάχιστον μια μεταβατική ζώνη ανάμεσα στο σταθερό τμήμα της μικροπλάκας της Ινδίας και το περιθώριο που έχει συγκρουσθεί.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να περιγράψει και να ερμηνεύσει, με γεωλογικούς όρους, το μηχανισμό γένεσης του σεισμού στο Gujarat, μετά την επίσκεψη που έγινε στην πληγείσα περιοχή αμέσως μετά την εκδήλωση του καταστροφικού σεισμού.

## 2. ΤΟ ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΙΝΔΙΑΣ

Η Ινδική χερσόνησος συνιστά ένα μεγάλο ηπειρωτικό θραύσμα, που αποσπάστηκε από την Γκοντβάνα και έχει ήδη συγκρουσθεί με την Ασία. Η σημαντική, όμως, σεισμικότητα, που εκδηλώνεται κατά μήκος του μετώπου της σύγκρουσης, αποδεικνύει ότι η προς Βορρά κίνηση της Ινδικής μικροηπείρου δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί. Νεώτερα γεωδαιτικά δεδομένα δείχνουν ότι το μεν μήκος της Ινδικής τράπεζας ελαττώνεται κατά 3mm/έτος σε μια διεύθυνση BBA-NNΔ, τα δε Ιμαλαία και το οροπέδιο του Θιβέτ (Transhimalaya) συρρικνώνονται λόγω της συμπίεσης κατά  $20 \pm 2$  mm/έτος και 9 mm/έτος αντίστοιχα (Bilham et al. 1998, Bilham & Gaur 2000).

Ο σεισμός στο Gujarat ( $M_s=7.7$ , 26/1/2001), όπως και το σύνολο των σεισμών που έχουν εκδηλωθεί τα τελευταία χρόνια στην Ινδική χερσόνησο, συνδέεται με την ενεργό συμπίεση που υφίσταται η Ινδία κατά την προώθησή της προς τα BBA. Η σημερινή συρρίκνωση της επιμήκους οροσειράς των Ιμαλαίων και του βορειότερα ευρισκόμενου ηπειρωτικού τεμάχους του Θιβέτ (Transhimalaya) ανήκει στα τελευταία στάδια μιας μακράς διαδικασίας - αρχικά υποβύθισης ωκεάνιου φλοιού, ύστερα σύγκρουσης ηπειρωτικών φλοιών και τελικά υπερσύγκρουσης (supercollision) - η οποία έχει αρχίσει από το Άνω Κρητιδικό (Gansser 1964, Le Fort 1973, 1975, 1989).

Η σύγκρουση των δύο ηπειρωτικών φλοιών και η παραμόρφωση των περιθωρίων τους έχει δημιουργήσει την οροσειρά των Ιμαλαίων από ιζήματα που συνεθλίβησαν και τα οποία κινήθηκαν με φορά από Βορρά προς Νότο, δηλαδή προς την πλευρά της Ινδικής μικροηπείρου (Le Fort 1989, Fuchs 1968, Fuchs 1996-97, Heim & Gansser 1939).



ράλληλα προς τις ρηξιγενείς ζώνες ίδιας διεύθυνσης που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Τα τεκτονικά στοιχεία στην ύπαιθρο, που επιβεβαιώνονται από τα γεωδαιτικά δεδομένα (Billham & Gaur, 2000), δείχνουν ότι οι εν λόγω ρηξιγενείς ζώνες χαρακτηρίζονται από μια πλαγιοανάστροφη συνιστώσα ολίσθησης, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται χαρακτηριστικές μορφές τεκτονικών βυθισμάτων (graben), όπως είναι αυτό του Kachchh γενικής διεύθυνσης Α-Δ, που οριοθετείται από δύο περιθωριακές ρηξιγενείς ζώνες, του Allah Bund Fault προς Βορρά και του Kachchh Mainland Fault προς Νότο (Εικ. 2).

Επισημαίνεται ότι η ρηξιγενής ζώνη του Allah Bund Fault αποκαλύφθηκε με το σεισμό του 1819 ( $M_s=7.7\pm0.2$ ). Η δραστηριοποίηση της ζώνης αυτής δημιούργησε ένα εντυπωσιακό μέτωπο (fault scarp) μέσα στις αλλουβιακές αποθέσεις που συνοδεύονταν από ανύψωση της τοπογραφίας κατά 6-9 m και είχε συνολικό μήκος 80-90 Km. Επίσης κατά το σεισμό του Anjar το 1956 ( $M_s=6.1$ ), που σχετίζεται με τη δραστηριοποίηση αντίστοιχων ρηξιγενών ζωνών νοτιότερα, το μέτωπο της ανύψωσης ήταν της τάξης του 1 m (Malik et al. 2000, σύμφωνα με γεωδαιτικά δεδομένα από Billham & Gaur, 2000).

Το δυναμικό καθεστώς κάτω από το οποίο βρίσκεται η περιοχή είναι, επίσης, υπεύθυνο για τις ανοδικές κινήσεις των μεγάλης κλίμακας ρηξιτεμαχών (horst), που γίνονται με ένα σύνθετο και πολύπλοκο τρόπο, με αποτέλεσμα να αποκαλύπτονται στα ανερχόμενα τμήματά τους τα μεσοζωικά πετρώματα, λόγω της επακόλουθης διάβρωσης. Αλλά και τα μικρότερης τάξης ρηξιτεμάχια παρουσιάζουν πολύπλοκες ανοδικές κινήσεις με σημαντικές κάμψεις των οριζόντων των ιζημάτων στα περιθωριά τους, ή μικρότερες στο εσωτερικό τους, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται ελλειπτικοί δόμοι, ασύμμετρα αντίκλινα, μεγάλης κλίμακας λοξοζωνικές πτυχές (flexures) αλλά και δομές τύπου questas ή mesas, με γενική διεύθυνση Α-Δ. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί ότι στα περισσότερα ρηξιτεμάχια το ένα περιθωρίό τους καθορίζεται από ρήγμα (ανάστροφο), συνήθως το βόρειο, ενώ το άλλο από κάμψη και παραμόρφωση των πετρωμάτων με την μορφή ανοικτών ασύμμετρων πτυχών ή kink bands (flexural-slip folding).

Με όλα τα ανωτέρω γίνεται φανερό ότι η ευρύτερη περιοχή του Kachchh παρουσιάζει μια διαρκή σεισμική δραστηριότητα, είναι ενεργή τουλάχιστον τα τελευταία 200 χρόνια, όπως αποδεικνύει η συνεχής σεισμικότητά της με σεισμούς, των οποίων τα καταγραφόμενα μεγέθη κυμαίνονται μεταξύ 3.5 και 8 της κλίμακας Richter.

#### 4. Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ 26<sup>ης</sup> ΙΑΝ. 2001

##### 4.1. Τεκτονική δομή επικεντρικής περιοχής

Η περιοχή που επλήγη περισσότερο από το σεισμό της 26<sup>ης</sup> Ιανουαρίου είναι η ευρύτερη επικεντρική περιοχή, εντοπίζεται στην λοφώδη περιοχή που εκτείνεται βόρεια από τον κόλπο του Kachchh και καλύπτει μια ζώνη με διεύθυνση περίπου Α-Δ (της τάξης των 100 km εκατέρωθεν του επικέντρου), από τη Nakhatrana και το Bhuj στα δυτικά μέχρι το Bhachau και το Rapar στα ανατολικά (Εικ. 2). Η μεγαλύτερη ρηξιγενής ζώνη στην περιοχή αυτή είναι γνωστή με το όνομα Kachchh Mainland Fault, έχει διεύθυνση ΑΝΑ-ΔΒΔ έως Α-Δ και συνολικό μήκος που υπερβαίνει τα 200 Km. Οριοθετεί την πεδινή περιοχή του Great Rann of Kachchh στα βόρεια από την λοφώδη ημιορεινή περιοχή της ενδοχώρας στα νότια.

Νοτιότερα εντοπίζονται δύο ακόμη, μικρότερης, όμως, κλίμακας, ρηξιγενείς ζώνες με αντίστοιχα χαρακτηριστικά και διεύθυνση Α-Δ. Η πρώτη εκτείνεται νότια από την πόλη του Bhuj (γνωστή ως Katrol Hill Fault) και η δεύτερη βόρεια από την πόλη του Anjar. Ανάμεσα στις ζώνες αυτές και προς το δυτικό τμήμα της λοφώδους, ημιορεινής περιοχής, υπάρχουν και ορισμένα μικρότερα ρήγματα (της τάξης των 20-50 Km), με διευθύνσεις κυρίως ΝΑ-ΒΔ και σπανιότερα Α-Δ. Προς τα ΒΑ, στην ευρύτερη περιοχή του Adhoi και του Rapar, εντοπίζονται ορισμένα, αντίστοιχης κλίμακας, ρήγματα με διεύθυνση Α-Δ. Σημειώνεται ότι 100-150 περίπου Km βόρεια από την πλειόσειστη περιοχή, και το Kachchh Mainland Fault, περνάει το ίχνος του Allah Bund Fault, που δραστηριοποιήθηκε και έδωσε τον, αντίστοιχου μεγέθους, σεισμό του 1819 (Εικ. 2).

Όλα τα ανωτέρω ρήγματα και ρηξιγενείς ζώνες ελέγχουν πλήρως το ανάγλυφο της περιοχής, δημιουργώντας χαρακτηριστικές γεωμορφές, όπως έντονες μορφολογικές ασυνέχειες, εντυπωσιακά αλλουβιακά ριπιδία και κώνους κορημάτων, έντονη κατά βάθος διάβρωση κλπ. (Εικ. 3). Οι μορφολογικές εξάρσεις στο σύνολό τους αντιστοιχούν σε ανερχόμενα ρηξιτεμάχια, όπου μάλιστα η πτύχωση των στρωμάτων με τη μορφή μεγάλης κλίμακας ασύμμετρων ανοικτών συγκλίσεων και αντικλίσεων Α-Δ διεύθυνσης, φαίνεται να συμφωνεί απόλυτα με τη γεωμετρία και τον ανάστροφο χαρακτήρα των ρηγμάτων, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Από γεωμετρική άποψη, το σύνολο των ρηγμάτων αυτών στην ευρύτερη επικεντρική περιοχή, παρουσιάζονται σχεδόν κατακόρυφα, ή με μεγάλες κλίσεις (γύρω στις  $60^{\circ}$ - $80^{\circ}$ ) προς τα νότια όπου βρίσκεται και το ανερχόμενο τέμαχος, φανερώνοντας έναν σαφή ανάστροφο χαρακτήρα. Μικρότερης κλίμακας ρήγματα που εντοπίστηκαν μέσα στα όρια ορισμένων ρηξιγενών ζωνών δείχνουν μια ξεκάθαρη ανάστροφη κίνηση, (με μικρότερη ή μεγαλύτερη συμμετοχή οριζόντιας συνιστώσας) επιβεβαιώνοντας έτσι και την παρατήρηση για τις μεγά-



λης κλίμακας ρηξιγενείς ζώνες. Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι τα ρήγματα αυτά αποτελούν την εξέλιξη πυκτών τύπου kink band (ή flexural-slip folds), με αντίστοιχη γεωμετρία και κινηματικούς δείκτες. Οι δομές αυτές δεν παρατηρούνται μόνο στη μικρή κλίμακα, αφού σε ορισμένες περιπτώσεις οι, μεγάλης κλίμακας, μορφολογικές ανωμαλίες δεν συνδέονται άμεσα με σαφείς ρηξιγενείς επιφάνειες (σπάσιμο δηλαδή), αλλά με πλαστική παραμόρφωση των πετρωμάτων.

#### 4.2. Σεισμικές διαρρηξεις και σεισμικό ρήγμα

Από την λεπτομερή μελέτη της ευρύτερης επικεντρικής περιοχής, εντοπίστηκαν αρκετές εδαφικές διαρρηξεις, σε διάφορες κλίμακες, που φαίνεται να σχετίζονται, άμεσα ή έμμεσα, με το ρήγμα που έδωσε το σεισμό της 26<sup>ης</sup> Ιανουαρίου. Οι διαρρηξεις αυτές εντοπίζονται σε μια ζώνη με διεύθυνση περίπου Α-Δ έως ΑΝΑ-ΔΝΔ, η οποία εκτείνεται σε μια απόσταση 50 περίπου Km εκατέρωθεν του Bhachau, δηλαδή στην ίδια ευρύτερη περιοχή που δίδεται και το επίκεντρο (Εικ. 2).

Η μεγαλύτερη διάρρηξη (Εικ. 4α), εντοπίστηκε 20 περίπου Km ΒΒΔ από το Bhachau, περίπου στην ανατολική προέκταση του Kachchh Mainland Fault και παρουσιάζει ένα συνολικό μήκος που κυμαίνεται γύρω στο 1-1,5 Km.

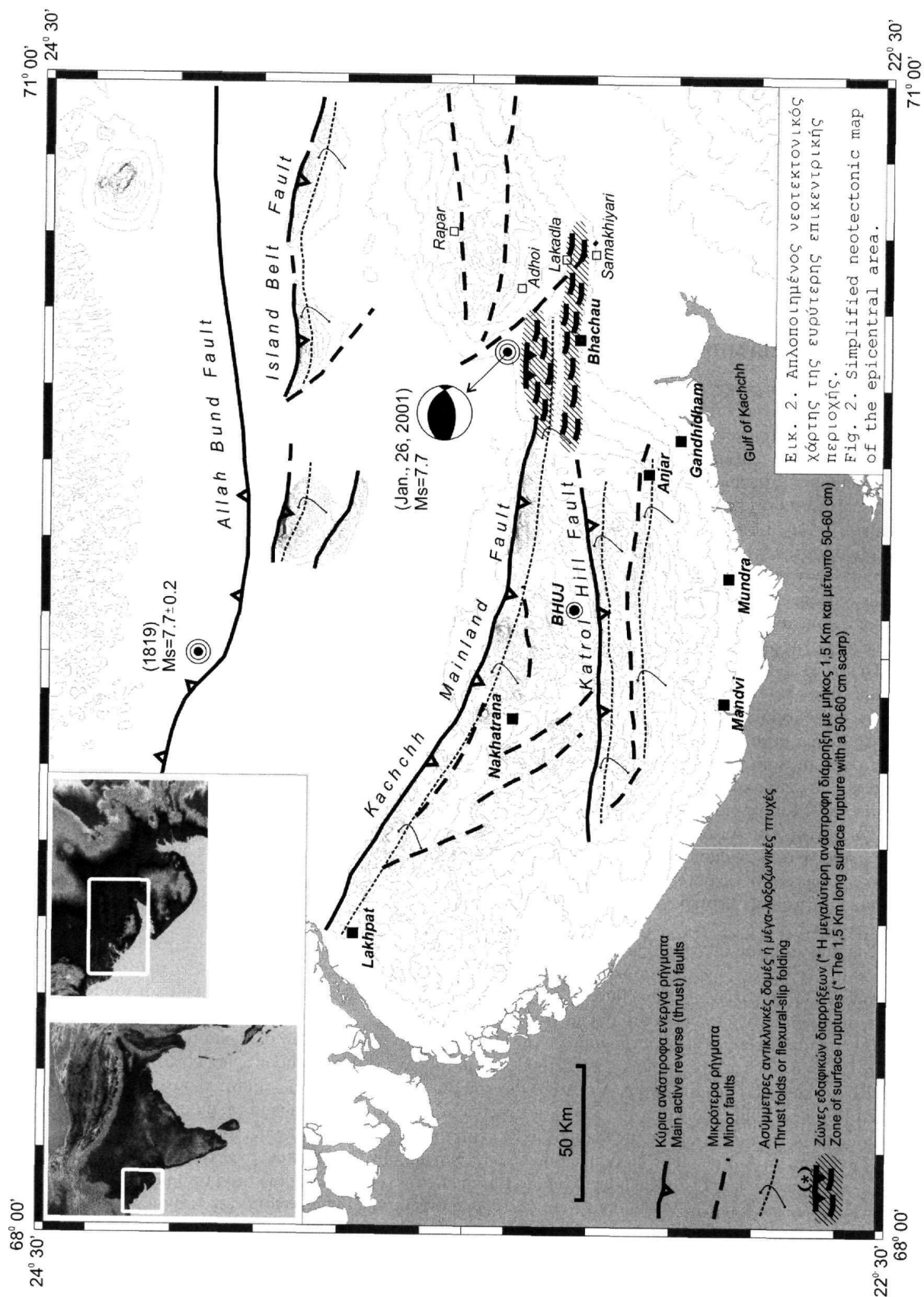
Η γενική διεύθυνση είναι Α-Δ έως ΑΒΑ-ΔΝΔ (γύρω στις 80°) και το ίχνος δεν είναι συνεχόμενο αλλά φαίνεται να παρουσιάζει μια κλιμακωτή διάταξη. Η μορφολογική ανωμαλία που έχει δημιουργήσει στους πρόσφατους χαλαρούς σχηματισμούς υπερβαίνει κατά θέσεις τα 60-70 cm, και γίνεται πολύ μικρότερη στα σημεία που η διάρρηξη αλλάζει θέση. Ιδιαίτερο άνοιγμα δεν παρατηρείται κατά μήκος της διάρρηξης και η όλη γεωμετρία δείχνει έναν ανάστροφο χαρακτήρα με την επιφάνεια της διάρρηξης να κλίνει γύρω στις 60°-80° προς Νότο και το νότιο, ανερχόμενο, τέμαχος να υπέρκειται του βόρειου που είναι το κατερχόμενο. Εκτός από την κατακόρυφη αυτή κίνηση εντοπίστηκε και η συμμετοχή οριζόντιας δεξιόστροφης συνιστώσας (το ανερχόμενο τέμαχος κινήθηκε προς τα δυτικά και το κατερχόμενο προς τα ανατολικά), δίνοντας στη διάρρηξη έναν πλαγιο-ανάστροφο χαρακτήρα.

Άλλη διάρρηξη με τόσο μεγάλη μετατόπιση δεν εντοπίστηκε στην περιοχή. Εντοπίστηκαν όμως πολλές άλλες, μικρότερης κλίμακας, διαρρηξεις που έτεμναν αλλουβιακές, συνήθως, αποθέσεις ή χαλαρά εδάφη, καθώς και τον ασφαλοτάτητα του οδικού δικτύου που οδηγεί από το Bhachau στο Bhuj και τα παρακείμενα χωριά. Το μήκος τους κυμαινόταν από μερικά μέτρα μέχρι αρκετές δεκάδες ή, σπανιότερα, και εκατοντάδες μέτρα ενώ οι διευθύνσεις τους ήταν τόσο Α-Δ όσο και ΔΒΔ-ΑΝΑ ή ΒΔ-ΝΑ και σε ελάχιστες περιπτώσεις ΒΑ-ΝΔ.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι διαρρηξεις με γενική διεύθυνση περίπου Α-Δ παρουσίαζαν τα ίδια κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά με τη μεγάλη διάρρηξη που περιγράφηκε προηγουμένως και πιο συγκεκριμένα φανέρωναν ένα συμπίεστικό χαρακτήρα και μια πλαγιο-ανάστροφη κίνηση. Στην Εικ. 4β διακρίνεται μια τυπική, τέτοιου τύπου διάρρηξη που τέμνει τον ασφαλοτάτητα, αλλά και τα παρακείμενα χαλαρά ιζήματα, της οδού που οδηγεί από το Bachau στο Bhuj. Η κύρια επιφάνεια της διάρρηξης κλίνει γύρω στις 70°-75° προς Νότο με ανερχόμενο, κατά 3-4 cm, το νότιο ρηξιτέμαχος, κίνηση που συνοδεύεται και από μια πλάγια, δεξιόστροφη, συνιστώσα της τάξης του 1 cm. Εκτός από την κύρια αυτή διάρρηξη, μισό μέτρο πιο δίπλα, εντοπίζεται και η συζυγής της επιφάνεια, η οποία όμως δεν εκφράζεται με σαφή διάρρηξη και μετακίνηση αλλά με πλαστική παραμόρφωση του ασφαλοτάτητα και των ιζημάτων (flexural folding). Η κλίση της είναι λίγο μικρότερη, γύρω στις 60°-65° προς Βορρά, και μάλιστα το βόρειο, ανερχόμενο, ρηξιτέμαχος έχει μετακινηθεί ελάχιστα συμπιέζοντας και παραμορφώνοντας το χώρο ανάμεσα στις δύο συζυγείς επιφάνειες με τη μορφή ενός συγκλίνου.

Στην ευρύτερη περιοχή η κλίση των διαρρηξεων αυτών παρουσιάζεται τότε προς Νότο και τότε προς Βορρά, με ανερχόμενο, αντίστοιχα, τότε το νότιο και τότε το βόρειο ρηξιτέμαχος. Το άλμα είναι συνήθως της τάξης των μερικών εκατοστών και σπανιότερα μεγαλύτερο. Η ανάπτυξή τους είναι συστηματική και ακολουθεί, τις περισσότερες φορές, μια λοξή κλιμακωτή διάταξη. Μάλιστα εντοπίστηκαν δύο συγκεκριμένες χωριστές ζώνες, αν και στο χώρο ανάμεσα από αυτές εντοπίζονται αρκετές ακόμα διαρρηξεις. Η πρώτη, και μεγαλύτερη, από αυτές ακολουθεί περίπου τη γραμμή Bhachau-Lakadla αναπτύσσεται, δηλαδή, στην προέκταση της ρηξιγενούς ζώνης του Katrol Hill Fault, ενώ η δεύτερη λίγο βορειότερα, στον ευρύτερο χώρο των ανατολικών απολήξεων του Kachchh Mainland Fault, στον ίδιο δηλαδή χώρο που εντοπίστηκε και η μεγαλύτερη, σε μήκος και άλμα, διάρρηξη (Εικ. 2).

Σε αντίθεση με τις Α-Δ αυτές διαρρηξεις, όσες παρουσιάζουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ ή ΔΒΔ-ΑΝΑ, εμφανίζουν μια τελείως διαφορετική κινηματική και δυναμική εικόνα, αφού τις περισσότερες φορές συνοδεύονται από άνοιγμα που φανερώνει έναν εφελκυστικό χαρακτήρα. Το μέγεθός τους κυμαίνεται από 1-2 m μέχρι και αρκε-





τές δεκάδες μέτρα (σπανιότερα και μεγαλύτερα) ενώ η κατανομή τους στο χώρο δεν είναι τυχαία. Μάλιστα εντοπίστηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση οι ΒΔ-ΝΑ αυτές διαρρήξεις αναπτύσσονται συστηματικά σε συγκεκριμένες ζώνες με γενική διεύθυνση Α-Δ και η όλη διάταξη και γεωμετρία τους δίνει την εικόνα περαιοειδών μέγα-διακλάσεων που αναπτύσσονται σε δεξιόστροφη ζώνη διάτμησης με διεύθυνση Α-Δ. Οι ζώνες αυτές εντοπίζονται κυρίως βόρεια από το Bachau, στον ευρύτερο χώρο της ανατολικής προέκτασης του Kachchh Mainland Fault και των διαρρήξεων με διεύθυνση Α-Δ και σπανιότερα νοτιότερα, στην προέκταση της ζώνης του Katrol Hill Fault, στη γραμμή Bhachau-Lakalda. Στη δεύτερη περίπτωση οι διαρρήξεις αυτές δεν παρουσιάζουν συγκεκριμένη κατανομή και τις περισσότερες φορές στην ίδια περιοχή εντοπίζονται και αντίστοιχου τύπου διαρρήξεις με διαφορετικές διευθύνσεις (κυρίως ΒΑ-ΝΔ και σπανιότερα Β-Ν).

Οι περιπτώσεις αυτές εντοπίζονται κυρίως στην ευρύτερη περιοχή του Bhachau και σπανιότερα βορειότερα και φαίνεται να συνδέονται άμεσα με φαινόμενα ρευστοποίησης (και σπανιότερα καθιζήσεων και κατολισθήσεων) αφού εντοπίζονται συνήθως στους ίδιους γεωγραφικούς χώρους.

## 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ευρύτερη περιοχή της επαρχίας του Gujarat, παρότι βρίσκεται εκατοντάδες χιλιόμετρα νότια από τη ζώνη της σύγκρουσης στην περιοχή των Ιμαλαίων, χαρακτηρίζεται από υψηλή σεισμικότητα με μηχανισμούς γένεσης που φανερώνουν ένα περιβάλλον συμπίεσης, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται άμεσα και από τις παρατηρήσεις υπαίθρου, δεδομένου ότι η περιοχή διασχίζεται από μεγάλης κλίμακας ανάστροφα ρήγματα που, σε συνδυασμό με τις μεγάλης κλίμακας ασύμμετρες αντικλινικές δομές, έχουν διαμορφώσει, σχεδόν αποκλειστικά, το ανάγλυφο της περιοχής. Προβληματισμοί σχετικά με το αν η συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί μια “κατ’ εξαίρεση” ενεργή ζώνη στο εσωτερικό μιας σταθερής πλάκας, ή μια μεταβατική ζώνη προς το μέτωπο της σύγκρουσης στην περιοχή των Ιμαλαίων (πάντα λαμβάνοντας υπόψη τις κλίμακες μεγέθους των γεωδυναμικών φαινομένων στην περιοχή αυτή), είναι υπαρκτοί στη βιβλιογραφία αλλά και τις συζητήσεις στο Διαδίκτυο (Lettis & Hengesh 2001, Ballantyne 2001), δεν αφορούν όμως, σε πρώτη φάση τουλάχιστον, τη συγκεκριμένη εργασία, που σαν στόχο έχει να συνδέσει, να συσχετίσει και να ερμηνεύσει την ενεργό τεκτονική παραμόρφωση της περιοχής με το σεισμικό γεγονός της 26<sup>ης</sup> Ιαν. 2001.

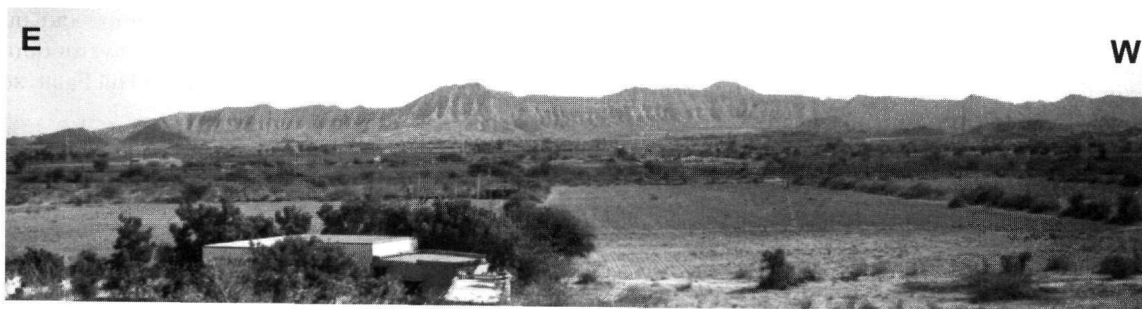
Το πρώτο ερώτημα που τίθεται είναι αν εκδηλώθηκε στην ευρύτερη επικεντρική περιοχή το σεισμικό ρήγμα που έδωσε το σεισμό και αν αυτό παρουσιάζει τα κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά που δίνονται από το μηχανισμό γένεσης του σεισμού (ανάστροφο με συμμετοχή οριζόντιας κίνησης). Το ερώτημα αυτό αποκτά ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι ο προηγούμενος πολύ ισχυρός καταστροφικός σεισμός που έπληξε την ίδια περιοχή (1819) παρουσίαζε αντίστοιχα γεωμετρικά, κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά και το σεισμικό ρήγμα εκδηλώθηκε με ένα μέτωπο της τάξης των 6-9 μέτρων και συνολικό μήκος που έφθανε τα 90 Km (γνωστό με το όνομα Allah Bund Fault). Το ερώτημα αυτό μάλιστα έχει πάρει, ήδη, διαστάσεις “διαμάχης” στο Διαδίκτυο (Miranda 2001, Lettis 2001), μέσα από τη γενική διαπίστωση ότι στην περίπτωση του πρόσφατου σεισμού δεν εντοπίστηκε πουθενά τέτοιας έκτασης και μετακίνησης διάρρηξη, οπότε τίθεται το ερώτημα αν οι μικρότερης κλίμακας εδαφικές διαρρήξεις που παρουσιάστηκαν σχετίζονται άμεσα με το σεισμικό ρήγμα ή με δευτερογενή φαινόμενα που συνήθως συνοδεύουν ένα σεισμό (ρευστοποιήσεις, κατολισθήσεις κλπ.).

Το επίκεντρο του σεισμού βρίσκεται βόρεια από το Bhachau, δηλαδή 50-70 Km νοτιότερα από το επίκεντρο και το ίχνος του ρήγματος του σεισμού του 1819. Συμπίπτει σε γενικές γραμμές με τις ανατολικές απολήξεις δύο άλλων μεγάλων, Α-Δ διεύθυνσης, ρηξιγενών ζωνών, του Kachchh Mainland Fault και του Katrol Hill Fault, που συγκλίνουν εν μέρει στο σημείο αυτό (Εικ. 2).

Η θέση του επίκεντρου, σε συνδυασμό με την κατανομή των καταστροφών αλλά και των συνοδών γεωδυναμικών φαινομένων (ρευστοποιήσεις, κατολισθήσεις, μεταβολές στάθμης υδροφόρων οριζόντων κλπ.) που εντοπίζονται αυστηρά σε μια ζώνη Α-Δ εκατέρωθεν του Bhachau και της επικεντρικής περιοχής και εκτείνονται δυτικά μέχρι το Bhuj (γύρω στα 100 Km) και ανατολικά μέχρι το Ahmedabad (περισσότερα από 300 Km), καθορίζουν σε γενικές γραμμές την αναμενόμενη θέση του ρήγματος που σχετίζεται με το σεισμό.

Η μεγαλύτερη Α-Δ σεισμική διάρρηξη (μήκος 1-1,5 Km και συνολική κατακόρυφη μετακίνηση της τάξης των 60 cm) που εντοπίστηκε 15-20 Km βόρεια από το Bhachau, στην ανατολική προέκταση της ρηξιγενούς ζώνης του Kachchh Mainland Fault, αλλά και ορισμένες άλλες, μικρότερης κλίμακας, αντίστοιχες διαρρήξεις που τη συνοδεύουν παρουσιάζουν τέτοια γεωμετρικά, κινηματικά και δυναμικά χαρακτηριστικά (σαφή και σταθερή κλιμακωτή γεωμετρική διάταξη, απουσία ανοίγματος, ανάστροφη κίνηση με συμμετοχή πλάγιας δεξιόστροφης συνιστώσας) που δεν μπορούν να ερμηνευθούν με δευτερογενή φαινόμενα τύπου liquefaction και lateral spreading αλλά μπορούν να θεωρηθούν σαν εκδήλωση του σεισμικού ρήγματος (ή και κλάδων αυτού – branch faults) που





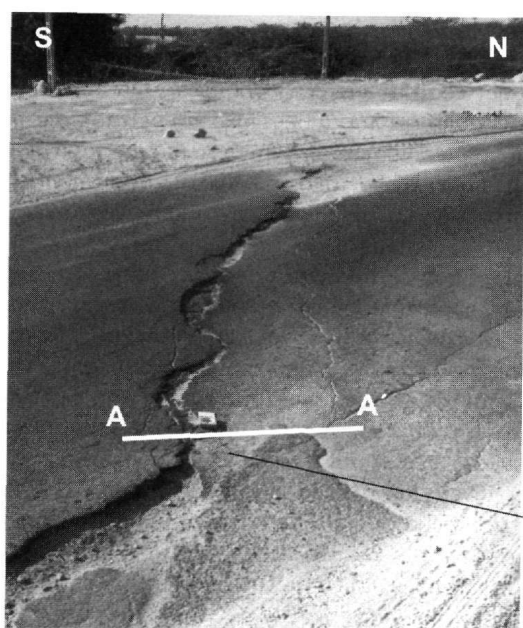
Εικ. 3. Η εντυπωσιακή ανάστροφη ρηξιγενής ζώνη του Katrol Hill Fault που οριοθετεί τα πτυχωμένα και αναθολωμένα μεσοζωϊκά πετρώματα του ορεινού αναγλύφου από τα πρόσφατα ιζήματα της πεδινής περιοχής.

Fig. 3. Panoramic view of the Katrol Hill Fault and the uplifted asymmetric anticline of the rocky mainland (thrust fold and fault and flexural-slip folding).



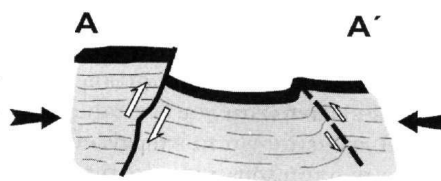
Εικ. 4α. Η μεγαλύτερη σεισμική διάρρηξη με διεύθυνση Α-Δ (μήκος 1,5 Km και μέτωπο γύρω στα 60 cm) στην ανατολική προέκταση της ρηξιγενούς ζώνης του Kachchh Mainland Fault.

Fig. 4a. The main E-W surface rapture (1,5 Km long with a 60 cm scarp), located at the eastern prolongation of Kachchh Mainland Fault.



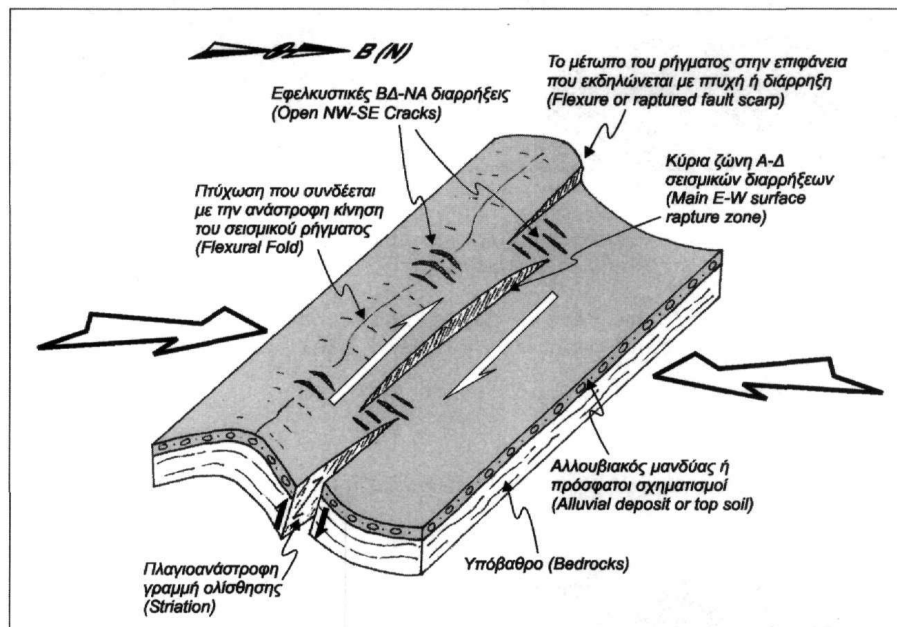
Εικ. 4β. Μικρότερης κλίμακας σεισμικές διαρρήξεις, διεύθυνσης Α-Δ, με σαφή ανάστροφη κίνηση που συνοδεύεται από μικρή συμμετοχή δεξιόστροφης οριζόντιας συνιστώσας (διαδρομή Bhachau - Bhuj).

Fig. 4a. Small scale surface raptures as the result of secondary minor thrust faults, accompanied by right lateral movement (road from Bhachau to Bhuj).





ταυτίζεται με την ανατολική προέκταση του Kachchh Mainland Fault (Εικ. 2). Αντίστοιχα στοιχεία παρουσιάζουν και αρκετές σεισμικές διαρρήξεις νοτιότερα στην ευρύτερη περιοχή του Bhachau, μόνο που εδώ φαίνεται αυτές να ταυτίζονται με την ανατολική προέκταση της μικρότερης κλίμακας ρηξιγενούς ζώνης του Katrol Hill Fault, και πιθανά αποτελούν μια δεύτερη επιφάνεια που δραστηριοποιήθηκε (Εικ. 2).



**Εικ. 5. Σχηματικό διάγραμμα όπου απεικονίζονται οι επιφανειακές δομές που εκδηλώθηκαν κατά μήκος του Α-Δ σεισμικού ρήγματος.**

**Fig. 5. Schematic diagram showing the surficial features associated with the E-W surface rupture zone.**

Ο σαφής ανάστροφος χαρακτήρας των διαρρήξεων αυτών, σε συνδυασμό με την πλάγια δεξιόστροφη μετατόπιση, που πιστοποιείται τόσο από τις μετρήσεις στο ύπαιθρο όσο και από την κλιμακωτή διάταξη των διαρρήξεων, συμφωνούν απόλυτα τόσο με το μηχανισμό γένεσης του πρόσφατου σεισμού (αλλά και των παλαιότερων σεισμών), όσο και με τη γενικότερη εικόνα που προκύπτει από την μελέτη της τεκτονικής της ευρύτερης περιοχής. Η απουσία μεγαλύτερης κλίμακας μετακινήσεων κατά μήκος των επιφανειών που δραστηριοποιήθηκαν (κάτι που αναμενόταν από το μέγεθος του σεισμού αλλά και όπως συνέβη με τον αντιστοίχου μεγέθους σεισμό του 1819) μπορεί να αποδοθεί σε flexural τύπου παραμόρφωση (και ανύψωση) κατά μήκος των αντικλινικών δομών του Kachchh Mainland Fault, πρωτίτως, και του Katrol Hill Fault, δευτερευόντως, γεγονός που αναμένεται να πιστοποιηθεί από τις γεωδαιτικές μετρήσεις και τα ιντερφερογράμματα των δορυφορικών εικόνων, που θα δώσουν μια σαφή εικόνα για το συνολικό βαθμό της παραμόρφωσης και μετατόπισης εξ' αιτίας του σεισμού. Σημειώνεται ότι τέτοιου τύπου παραμόρφωση, σε μικρότερη βέβαια κλίμακα, παρατηρήθηκε σε αρκετές εδαφικές διαρρήξεις που εκδηλώθηκαν με τον πρόσφατο σεισμό, αλλά είναι και συνήθης για το "στυλ" της τεκτονικής παραμόρφωσης της περιοχής, όπως αναλυτικά περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι, σχεδόν εγκάρσιες ΒΔ-ΝΑ, ανοικτές εδαφικές διαρρήξεις που διατάσσονται σε ζώνες με γενική διεύθυνση Α-Δ, μπορούν πολύ καλά να ερμηνευθούν σαν το αποτέλεσμα τοπικού εφελκυσμού που αναπτύχθηκε είτε από τη δεξιόστροφη οριζόντια διάτμηση κατά μήκος των επιφανειών που δραστηριοποιήθηκαν, είτε στα κορυφαία τμήματα των αντικλινικών δομών της flexural τύπου παραμόρφωσης που εκδηλώθηκε επίσης κατά μήκος των ίδιων επιφανειών (Εικ. 5). Φυσικά δεν παραγνωρίζεται το γεγονός ότι υφίστανται και πάρα πολλές, αριθμητικά και σε μέγεθος, διαρρήξεις που σχετίζονται άμεσα με φαινόμενα τύπου liquefaction και lateral spreading (κυρίως στην υπό έκταση ευρισκομένη περιοχή των κορυφαίων των αντικλινικών δομών), γεγονός που έχει να κάνει και με τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Η ερμηνεία αυτή, όμως, δεν μπορεί να αποτελεί τον κανόνα για το σύνολο των δομών. Η διαπίστωση μάλιστα ότι στον χώρο της εμφάνισης των διαρρήξεων αυτών η καταστροφή είναι καθολική (κάτι που δεν παρατηρήθηκε για το σύνολο της πληγείσας περιοχής), δεν αφήνει καμιά αμφιβολία ότι πρόκειται για τα επιφανειακά ίχνη των επιφανειών που δραστηριοποιήθηκαν με το σεισμό και οι οποίες είτε αποτελούν τμήματα της κύριας (ή δευτερεύουσας) ρηξιγενούς ζώνης που έδωσε το

σεισμό (ανατολική προέκταση του Kachchh Mainland Fault ή του Katrol Hill Fault), είτε θυγατρικούς κλάδους αυτών (branch faults).

Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στη συγκεκριμένη εργασία αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος και έχουν προκύψει από την αρχική επεξεργασία των στοιχείων που έγινε κάτω από την πίεση του εξαιρετικά περιορισμένου χρονικού διαστήματος μέχρι την υποβολή των εργασιών, με σκοπό να επισημανθούν οι διαφορές στην κλίμακα και το είδος των φαινομένων ανάμεσα σε δύο σειсмоγενείς περιοχές (Ινδία – Ελλάδα), σε διαφορετικά, όμως, γεωδυναμικά περιβάλλοντα. Τα στοιχεία που θα προκύψουν από την αναλυτική και λεπτομερή επεξεργασία του πλήθους των στοιχείων που συλλέχθηκαν από την αποστολή στην Ινδία, θα αποτελέσουν το αντικείμενο άλλων επιστημονικών ανακοινώσεων.

Αναφέρεται, τέλος, ότι ο καταιγισμός των πληροφοριών και στοιχείων για το σεισμό της Ινδίας στο Διαδίκτυο, μας ανάγκασε να χρησιμοποιήσουμε, με τη μορφή βιβλιογραφικών αναφορών, τις διευθύνσεις που αναφέρονται τα στοιχεία αυτά.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- BALLANTYNE, D. (2001): Earthquake in Gujarat, India, Jan 26, 2001. EERI Preliminary Report from the Field – February 10, 2001. [http://www.eeri.org/Reconn/bhuj\\_India/Fieldreport1.html](http://www.eeri.org/Reconn/bhuj_India/Fieldreport1.html)
- BASSOULLET, J.P., COLCHEN, M. & MOUTERDE, R. (1977). Esquisse paleographique et essai sur l' evolution geodynamique de l' Himalaya. Mem. h. ser. Soc. geol. Fr., No 8, 213-234.
- BHATIA, S.C., RAVI-KUMAR, M. & GUPTA, H.K. (2001): A probabilistic seismic hazard map of India and adjoining regions. <http://seismo.ethz.ch/gshap/ict/india.html>
- BILHAM, R., BLUME, F., BENDICK, R. & GAUR, V. (1998). Geodetic constraints on the Translation and Deformation of India: Implications for future great Himalayan earthquakes. *Current Science*, 74, 3, 213-229.
- BILHAM, R. & GAUR, V. (2000). Geodetic contributions to the study of seismotectonics in India. *Current Science*, 79, 9, 1259-1268.
- BOSSART, P. & OTTIGER, R. (1989). Rocks of the Murree formation in Northern Pakistan: indicators of a descending foreland basin of Late Paleocene to middle Eocene. *Eclog. Geol. Helv.*, 82/1, 133-165.
- BOULIN, J. & BOUYX, E. (1977). Introduction a la geologie de l' Hindou Kouch occidental. Mem. h. ser. Soc. geol. Fr., No 8, 87-105.
- CRAWFORD, A. (1974). The Indian suture line, the Himalaya, Tibet and Gondwanaland. *Geol. Mag.*, III, 369-383.
- FUCHS, G. (1968). The geological history of the Himalayas. Rep. 22th Intern. Geol. Cong. Prague, 3, 174-181.
- FUCHS, G. (1996-97). The terrane Map of the Himalya. Explanatory notes. *Ann. Geol. Pays Hell.*, 37, 575-599.
- GANSSER, A. (1964). *Geology of the Himalayas*. Interscience Publishers, John Wiley and Sons, 189p.
- HEIM, A. & GANSSER, A. (1939). Central Himalaya: geological observations of the Swiss expedition 1936. *Mem. Soc. Helv. Sc. Nat.*, 73, 246p.
- HERAIL, G., MASCLE, G. & DELCAILLAN, B. (1986). Les Siwalinks de l' Himalaya du Nepal: un exemple d' evolution geodynamique d' un prisme d' accretion intracontinental. *Science de la Terre*, 47, 155-182.
- LE FORT, P. (1973). Les leucogranites a tourmaline de l' Himalaya sur l' exemple du granite du Manaslu (Nepal central). *B.S.G.F.*, 7, XV, No 5-6, 555-561.
- LE FORT, P. (1975). Himalaya: The collided Range. Present knowledge of the continental arc. *Am. Journ. Scinc.*, 275-A, 1-44.
- LE FORT, P. (1989). The Himalayan orogenic segment. In Sengor, A.M.C. (ed.), *Tectonic Evolution of the Tethyan Region*. Kluwer Academic Publishers, 289-386.
- LETTIS, W. (2001): BhujLettisLetter 20 Feb 01: <http://cires.colorado.edu/~bilham/BhujLettisComment.html>
- LETTIS, R.W. & HENGESH, J.V. (2001): Earthquake in Gujarat, India, Jan 26, 2001. EERI Preliminary Report from the Field – February 13, 2001. [http://www.eeri.org/Reconn/bhuj\\_India/Fieldreport2.html](http://www.eeri.org/Reconn/bhuj_India/Fieldreport2.html)
- MALIK, J.N., SOHONI, P.S., MERH, S.S. & KARANTH, R.V. (2000): Palaeoseismology and neotectonism of Kachchh, Western India: Active Fault Research for the New Millenium, *Procc. of the Kokudan Intern. Symp. & School on Active Faulting* (Okumura, K., Goto, H., & Takada, K. eds), <http://home.hiroshima-u.ac.jp/~jnmalik/malikpp1.html>
- MIRANDA, E. (2001): Untitled document. <http://cires.colorado.edu/~bilham/BhujOyoThrust.html>